Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 15, No. 2, 2025, p. 229-245

Investigating Engine Performance and Emission Characteristics during Testing of Diesel-Biodiesel Mixed Fuels Obtained from Vegetable Oils and their Modeling

S. R. Mousavi Seyedi [1], M. Askari [1*], S. M. R. Miri [2]

1- Mechanics of Biosystem Engineering Department, Sari Agricultural Sciences & Natural Resources University, Sari, Iran
2- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: m.askari@sanru.ac.ir)

Received: 30 June 2024
Revised: 07 September 2024
Accepted: 08 September 2024
Available Online: 15 April 2025

How to cite this article:
Mousavi Seyedi, S. R., Askari, M., & Miri, S. M. R. (2025). Investigating Engine Performance and Emission Characteristics during Testing of Diesel-Biodiesel Mixed Fuels Obtained from Vegetable Oils and their Modeling. *Journal of Agricultural Machinery*, *15*(2), 229-245. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2024.88750.1263

Introduction

In Asia, two-wheeled agricultural tractors predominantly use single-cylinder two-stroke diesel engines, which are characterized by high fuel consumption and substantial air pollution. At the same time, the severe environmental impacts of energy production from diminishing fossil fuel reserves are increasingly evident. Therefore, it is essential to develop sustainable and clean energy sources to meet these needs. Biodiesel is an alternative fuel that can be blended with conventional diesel to help reduce environmental pollution. In this study, diesel-biodiesel blends produced from rapeseed, soybean, and palm oil were evaluated for their effects on engine performance metrics, including power (P), torque (T), and specific fuel consumption (SFC). Furthermore, the emissions of pollutants (NOx, HC, CO, and CO_2) from these fuels were measured and modeled using linear and non-linear regression, as well as the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS).

Materials and Methods

To leverage the benefits of palm oil biodiesel, known for its high calorific value, along with the low kinematic viscosity of biodiesel derived from soybean and rapeseed oils, pure diesel was blended with 10% and 20% mixtures of rapeseed, soybean, and palm biodiesel, as well as 10% and 20% combinations of all three biodiesels. These nine fuel blends were tested at four engine speeds (1800, 2100, 2400, and 2700 rpm) under full load conditions. The diesel-biodiesel blends were produced at Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU) and transported to the engine laboratory at Tarbiat Modares University in Tehran, Iran, for detailed analysis. A total of 36 treatments were evaluated using a randomized complete block design (RCBD), incorporating four engine speeds and nine fuel types. The measured outputs included engine power, torque, specific fuel consumption, and pollutant emissions such as NOx, HC, CO, and CO_2. The collected data were used as input for modeling through both linear and non-linear regression in SPSS software, as well as ANFIS in MATLAB software.

Results and Discussion

This study evaluated nine diesel-biodiesel blends derived from palm, rapeseed, and soybean oils using a diesel engine in a controlled laboratory setting. Tests were carried out at four engine speeds—1800, 2100, 2400, and 2700 rpm—under full load conditions to assess engine performance and exhaust emissions. The results showed that for all tested fuel blends, power, specific fuel consumption, and pollutant emissions increased with

https://doi.org/10.22067/jam.2024.88750.1263

engine speed, while torque decreased. Based on the findings, a blend containing 20% palm biodiesel can be used as an alternative fuel in diesel engines without requiring any modifications. The modeling results indicated that non-linear regression provided better accuracy than linear regression. However, ANFIS demonstrated a much higher correlation between actual and predicted values, with R^2 exceeding 0.98 for both performance parameters and emissions, compared to R^2 values below 0.47 for linear regression and below 0.92 for non-linear regression. The ANFIS model achieved its highest and lowest R^2 values at 0.99 for specific fuel consumption (SFC) and 0.98 for power (P), respectively; substantially higher than those from linear regression, which yielded 0.47 for torque (T) and 0.00 for power. Non-linear regression resulted in R^2 values of 0.92 for SFC and 0.60 for carbon monoxide (CO), still lower than those achieved by ANFIS. Overall, the highest R^2 value recorded was 0.7525 for torque, and the lowest was 0.6112 for power.

Conclusion

Single-cylinder diesel engines, which have high fuel consumption and contribute to air pollution, are commonly used in two-wheel agricultural tractors across Asia. One approach to reducing the environmental impact of fossil fuels is to use biodiesel in these engines without requiring any modifications. The results of this study showed that a 20% blend of palm biodiesel can be an effective alternative fuel for diesel engines, with no need for engine modification. Furthermore, the modeling results indicated a significantly higher correlation ($R^2 > 0.98$) between actual and predicted values of performance variables and emissions using ANFIS, compared to linear regression ($R^2 < 0.47$) and non-linear regression ($R^2 < 0.92$). Therefore, ANFIS can be effectively used to accurately predict engine performance and emission parameters.

Keywords: ANFIS, Engine efficiency, Palm oil, Rapeseed oil, Soybean oil

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۵، شماره ۲، تابستان ۱٤۰٤، ص ۲٤٥-۲۲۹

بررسی ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور حین آزمون سوخت‌های ترکیبی دیزل- بیودیزل حاصل از روغن‌های گیاهی و مدل‌سازی آن‌ها

سیدرضا موسوی سیدی[۱]، محمد عسکری[۱*]، سید محمدرضا میری[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸

چکیده

در این تحقیق، پس از تولید سوخت‌های ترکیبی دیزل- بیودیزل روغن گیاهان کلزا، سویا و پالم، تأثیر آن‌ها بر عملکرد موتور (توان، گشتاور و مصرف سوخت ویژه) و آلاینده‌های خروجی (NO_x، HC، CO و CO_2) مدل‌سازی شد. دیزل خالص به همراه مخلوط‌های ۱۰ و ۲۰ درصد بیودیزل کلزا، سویا و پالم و مخلوط ۱۰ و ۲۰ درصد از ۳ بیودیزل مذکور در ۴ سرعت (۱۸۰۰، ۲۱۰۰، ۲۴۰۰ و ۲۷۰۰ دور بر دقیقه) تحت شرایط بار کامل موتور آزمایش شدند. داده‌ها به‌عنوان ورودی روش‌های مدل‌سازی رگرسیون خطی، غیرخطی و سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (انفیس) استفاده شدند. نتایج نشان داد که در همه سوخت‌های ترکیبی مقادیر توان، مصرف سوخت ویژه و تمامی آلاینده‌ها با افزایش سرعت موتور، افزایش اما گشتاور کاهش یافت. سوخت ترکیبی بیودیزل پالم ۲۰ درصد می‌تواند به‌عنوان سوخت جایگزین در موتورهای دیزلی بدون تغییر موتور استفاده شود. رگرسیون غیرخطی دقیق‌تر از نوع خطی بوده همچنین بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده متغیرهای عملکرد و آلایندگی موتور توسط انفیس، همبستگی بسیار بالاتری (ضریب تبیین بیشتر از ۰/۹۸) در قیاس با رگرسیون خطی (ضریب تبیین کمتر از ۰/۴۷) و غیرخطی (ضریب تبیین کمتر از ۰/۹۲) وجود دارد. بیشترین و کمترین ضرایب تبیین در معادلات ارائه‌شده توسط انفیس مربوط به پارامترهای SFC و P به‌ترتیب به میزان ۰/۹۹ و ۰/۹۸ است که بسیار بیشتر از ضرایب تبیین بیشینه و کمینه در معادلات رگرسیون خطی (۰/۴۷ و ۰/۰۰ به‌ترتیب مربوط به T و P) و غیرخطی (۰/۹۲ و ۰/۶۰ به‌ترتیب مربوط به SFC و CO) است.

واژه‌های کلیدی: انفیس، بازدهی موتور، روغن پالم، روغن سویا، روغن کلزا

مقدمه

به‌تازگی، مشکلات قابل‌توجهی از جمله افزایش شدید تقاضا و قیمت جهانی، کمبود عرضه، تجدیدناپذیری و آلودگی محیط‌زیست در نتیجه استفاده از سوخت‌های رو به اتمام فسیلی که حدود ۸۰ درصد انرژی مورد نیاز جهان را تأمین می‌کنند، به‌وجود آمده است. این امر محققان را بر آن داشته است تا به دنبال سوخت پاک جایگزینی بوده که با توسعه پایدار، حفظ و مدیریت و بهره‌وری انرژی و تغییرات آب و هوایی رابطه هم‌زیستی داشته باشد (Al-Dawody, Jazie, & Abdulkadhim Abbas, 2019). از طرفی موتورهای تک‌سیلندر با چرخه دو زمانه یکی از انواع موتورهای درون‌سوز بوده و پتانسیل تولید توان دو برابر موتورهای چهار زمانه مشابه خود را دارند. این موتورها همچنان به خاطر طراحی ساده، وزن سبک با قابلیت روشن شدن سریع در دمای پایین و هزینه به نسبت کم، مورد تقاضا بوده و در نوع دیزلی خود به‌عنوان یک منبع توان شناخته‌شده در تراکتورهای دو چرخ (تیلر کشاورزی)، مورد استفاده قرار می‌گیرند. جایگزینی سوخت‌های تجدیدپذیر مانند بیودیزل با سوخت دیزل در این موتورها، یک انتخاب در دسترس برای کاهش ناامنی انرژی و اثرات مضر استفاده از سوخت‌های فسیلی می‌باشد (Menacer & Bouchetara, 2014). بیودیزل به‌عنوان یک سوخت کمکی برای اختلاط با سوخت دیزل محبوبیت زیادی پیدا کرده است، زیرا سوختی پاک، تجدیدپذیر، زیست‌تخریب‌پذیر، سازگار با محیط‌زیست و غیرسمی است و می‌توان آن را به هر نسبتی با دیزل مخلوط کرد (Al-Dawudy, 2017). در زمینه عملکرد و آلایندگی سوخت بیودیزل ترکیب‌شده با دیزل

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۲- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: m.askari@sanru.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2024.88750.1263

تحقیقات زیادی انجام شده است. در پژوهشی، ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی ترکیبات سوخت بیودیزل حاصل از پلی آندرا به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی و دیزل خالص روی یک موتور دیزل شش سیلندر در سرعت‌های مختلف تحت بار کامل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سوخت بیودیزل تولیدشده مشابه سوخت دیزل می‌باشد. همچنین مشخص شد که آلاینده‌های خروجی از احتراق مخلوط‌های بیودیزل، به‌جز آلاینده NOx، کمتر از دیزل است. در نهایت مشخص شد که B10 مخلوط بهینه‌ای در بهبود عملکرد موتور از نظر سرعت، توان و بازده حرارتی و B30 مخلوط بهینه‌ای در جهت کاهش آلایندگی موتور بدون هیچ‌گونه تغییراتی در موتور دیزل است (Ogunkunle & Ahmed, 2020). در پژوهشی دیگر، ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی سوخت بیودیزل حاصل از روغن پسماند آشپزخانه با شرایط ۲۰ و ۴۰ درصد حجمی در ترکیب با دیزل خالص روی یک موتور دیزل تک‌سیلندر احتراق تراکمی در بارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش سوخت بیودیزل نسبت به دیزل مخصوصاً B40 مقدار بیشینه فشار داخل سیلندر ۲۴/۳۵ درصد افزایش اما مصرف سوخت ویژه ۲۲/۲۲ درصد کاهش می‌یابد. همچنین راندمان حرارتی ترمزی در مخلوط سوخت B40 کاهش قابل‌توجهی در حدود ۲۹/۹۱ درصد داشت. از طرفی در مخلوط سوخت B40، آلاینده‌های NOx، HC و CO به‌ترتیب ۶۱/۸۹ درصد، ۴۲/۴۲ درصد و ۶۳/۹۳ درصد نسبت به سوخت دیزل کاهش یافت. در نتیجه مخلوط سوخت B40 به‌عنوان سوخت بهینه انتخاب شد (Elkelawy *et al.*, 2021).

از سوی دیگر، روش‌های پیش‌بینی را در حالت کلی می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی نمود. مدل‌های ریاضی، مدل‌های تحلیلی و مدل‌های کامپیوتری. مدل‌های کامپیوتری به چندین دسته از جمله شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، منطق فازی (FIS)، سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS) و روش سطح پاسخ (RSM) دسته‌بندی می‌گردد (Askari *et al.*, 2021). با استفاده از این مدل‌های کامپیوتری و برنامه‌های شبیه‌سازی در تحقیقات علمی، پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی در مدت زمان کوتاه‌تر و صرف هزینه پایین‌تر صورت می‌گیرد. در همین زمینه، هوسوز و همکاران (Hosoz, Ertunc, Karabektas, & Ergen, 2013) به مدل‌سازی توان و آلاینده‌های CO و CO_2 موتور دیزل با استفاده از انفیس پرداختند. نتایج نشان داد که انفیس با دقت بالا (ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۹۴) توانست نتایج تجربی را مدل‌سازی نماید. قنبری و همکاران (Ghanbari *et al.*, 2015) به مدل‌سازی توان، گشتاور و مصرف سوخت ویژه موتور و آلاینده CO_2 در خروجی موتور دیزل حین آزمون سوخت دیزل در ترکیب با ذرات نانو با استفاده از انفیس پرداختند. نتایج نشان داد تابع عضویت منحنی گاوس (gaussmf) و ۲۰۰ دوره آموزش (تکرار) گزینه بهینه برای روند آموزش بود. افزودن ذرات نانو به سوخت دیزل موجب افزایش قدرت و گشتاور و کاهش مصرف سوخت ویژه موتور شد. با افزایش غلظت ذرات نانو در سوخت، انتشار آلاینده CO_2 افزایش یافت. سیاد و همکاران (Sayyed, Kumar Das, & Kulkarni, 2021) ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی شش مجموعه از مخلوط دیزل و بیودیزل جاتروفا، کارانجا، ماهوآ و پنبه با درصد حجمی ۱۰ و ۹۰ درصد روی یک موتور دیزل تک‌سیلندر به روش شبکه عصبی مصنوعی تحت بارگذاری کامل را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که کاهش در ویژگی‌های عملکردی راندمان حرارتی و بازده حجمی از ۰/۷۷ تا ۵/۶ درصد متغیر است. در مصرف سوخت ویژه کاهش قابل‌توجه ۸/۹۱ درصد مشاهده شد. ویژگی‌های احتراقی مخلوط‌های بیودیزل مشابه سوخت دیزل به‌دست آمد. از طرفی کاهش کلی در آلاینده CO به مقدار ۳۴/۰۵ و افزایش ۴۲/۵۴ درصد در آلاینده CO_2 برای همه مخلوط‌ها مشاهده شد.

در تحقیقی دیگر، ویژگی‌های آلایندگی یک موتور دیزل تک‌سیلندر با مخلوط بیودیزل جاتروفا حاوی ۳۰ درصد حجمی در ترکیب با دیزل به روش سطح پاسخ تحت نسبت تراکم‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مخلوط B30، آلاینده‌های HC و CO را به‌ترتیب در حدود ۱۶/۷ و ۲۴ درصد در مقایسه با دیزل خالص کاهش داد. با این حال افزایش قابل‌توجهی در میزان آلایندگی‌های NOx و CO_2 ثبت شد. از طرفی با افزایش بار و نسبت تراکم، آلاینده‌های HC و CO به‌طور قابل‌توجهی کاهش، اما CO_2 و NOx افزایش یافتند (Singh *et al.*, 2021). در بسیاری از پژوهش‌های مدل‌سازی، بیشتر از نوع خطی و بسیار کم از نوع غیرخطی روش رگرسیون به‌عنوان در دسترس‌ترین نوع مدل‌سازی در مقام مقایسه با سایر روش‌های کامپیوتری مانند شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی، انفیس و روش سطح پاسخ استفاده شده است (Sayyed *et al.*, 2021).

تاکنون، آزمون ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور حین استفاده از مخلوط دیزل- بیودیزل حاصل از گیاهان کلزا، سویا و پالم به‌خصوص مخلوط سه‌گانه آن‌ها به دلیل تأثیرگذاری بیشتر این نوع روغن‌ها بر روی ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور دیزل به‌علاوه استفاده هم‌زمان از رگرسیون خطی، غیرخطی و سیستم استنتاج فازی- عصبی (انفیس) به‌منظور پیش‌بینی ویژگی‌های مذکور و مقایسه نتایج آن‌ها در تحقیقات مغفول مانده است. بنابراین، هدف اصلی تحقیق حاضر، ارزیابی ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور تک‌سیلندر پاشش مستقیم با استفاده از شش مجموعه مخلوط تک‌گانه و دو مجموعه مخلوط سه‌گانه بیودیزل حاصل از روغن‌های کلزا، سویا و پالم در نسبت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد با محدوده سرعت متغیر موتور از ۱۸۰۰ تا ۲۷۰۰ دور بر دقیقه با گام ۳۰۰ دور بر دقیقه در شرایط بار کامل و پیش‌بینی نتایج با استفاده از مدل‌های رگرسیون

خطی، غیرخطی و سامانه استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (انفیس) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

فرآیند استخراج روغن و تولید سوخت بیودیزل

باتوجه به مغفول ماندن استحصال بیودیزل از روغن گیاهان کلزا، سویا و پالم در تحقیقات و به دلیل تأثیرگذاری بیشتر این نوع روغن‌ها بر روی ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور دیزل، از آن‌ها به عنوان روغن‌های پایه تولید سوخت بیودیزل در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری استفاده شد (Khiraiya *et al.*, 2021). روغن‌ها به کمک حلال N- هگزان به دلیل کم‌هزینه بودن و عملکرد نسبی بالای آن در برابر سایر انواع حلال‌ها از دانه‌های کلزا، سویا و پالم استخراج شد (Ogunkunle & Ahmed, 2019b; Lee, Yi, Cho, & Ahn, 2022). آزمایش به مدت ۵ ساعت در دمای استخراج ۶۲ درجه سانتی‌گراد با استفاده از نسبت دانه به حلال ۰/۰۴ گرم در میلی‌لیتر انجام شد. تضمین استفاده کاتالیز مستقیم قلیایی برای واکنش ترانس‌استریفیکاسیون مورد نیاز برای تبدیل روغن به بیودیزل، اسید چرب آزاد (FFA) روغن‌ها بود که به‌طور میانگین تقریباً ۰/۹۲ درصد اندازه‌گیری شد. لذا از شرایط بهینه گزارش‌شده اوگونکونله و احمد (Ogunkunle & Ahmed, 2019a) استفاده شد. بدین صورت که برای انجام واکنش ترانس‌استریفیکاسیون از متانول به دلیل واکنش سریع و زنجیره عملکردی کوتاه‌تر به‌عنوان الکل و از پتاسیم هیدروکسید با ۱ درصد وزنی روغن و نسبت مولی الکل به روغن ۱ به ۶ به‌عنوان کاتالیزور استفاده شد. برای بهبود عدد ستان و مقادیر گرمایش بیودیزل‌های تولیدشده از روغن‌های گیاهی و کاهش ویسکوزیته عموماً ترانس استریفیکاسیون مورد نیاز است. نمونه‌ای از سوخت‌های بیودیزل تولیدشده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمونه‌ای از بیودیزل تولیدی پالم (سمت راست) و سویا (سمت چپ)

Fig. 1. Palm (right) and soybean (left) biodiesel samples

آماده‌سازی مخلوط‌ها

به‌منظور انجام آزمون‌های عملکرد و آلایندگی موتور، ۹ نوع سوخت شامل دیزل خالص به‌عنوان شاهد به همراه ۶ مخلوط تک‌گانه و ۲ مخلوط سه‌گانه سوخت دیزل- بیودیزل حاصل از گیاهان کلزا (BC)، سویا (BS) و پالم (BP) با ۱۰ و ۲۰ درصد حجمی مطابق با جدول ۱ تهیه شد. جرم مولی (جرم اتمی) آن‌ها به همراه نحوه تعریف در ترسیمه‌های انفیس نیز در جدول ۱ آمده است.

جدول ۲ بیانگر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سوخت‌های تحت بررسی با استفاده از روابط استاندارد انجمن ایالات متحده امریکا برای آزمایش و مواد (ASTM) تعیین شد. جرم مخصوص و ویسکوزیته نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ویسکومتر مویرگی شیشه‌ای مدرج تعیین شد. نقطه اشتعال با استفاده از آزمونگر فنجان بسته Pensky-Martens تعیین شد. نقطه ابری با استفاده از روش ASTM D2500 توسط بازرسی بصری برای نمایان شدن مه هنگام سرد شدن نمونه در یخچال تعیین شد.

مشخصات موتور و روش آزمایش

به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور حین استفاده از مخلوط‌های سوخت تولیدشده، یک موتور دیزل تک‌سیلندر در چهار دور موتور شامل ۱۸۰۰، ۲۱۰۰، ۲۴۰۰ و ۲۷۰۰ دور بر دقیقه تحت بارگذاری کامل در دانشگاه تربیت مدرس مورد بررسی قرار گرفت. اجزای اصلی مورد استفاده عبارتند از: موتور دیزل تک‌سیلندر، دینامومتر جریان گردابی D400، واحد کنترل برای اعمال بار همراه با نمایشگر دیجیتال، مخازن ذخیره سوخت برای مخلوط بیودیزل و دیزل، سیستم جمع‌آوری اطلاعات (کامپیوتر)، خروجی یا اگزوز، آلاینده‌سنج جهت تجزیه و تحلیل گاز و حسگرهای مختلف برای اندازه‌گیری سوخت. باتوجه به ۴ دور موتور و ۹ نوع سوخت مجموعاً ۳۶ آزمون انجام شد.

جدول ۱- مشخصات مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل مورد مطالعه به همراه جرم مولی و نحوه تعریف در ترسیمه‌های انفیس

Table 1- Properties of diesel and biodiesel fuel mixtures with the molar mass and description in ANFIS diagrams

نوع سوخت **Fuel Type**	**B0 (D100)**	**BS10**	**BS20**	**BP10**	**BP20**	**BR10**	**BR20**	**BSRP10**	**BSRP20**
مفهوم Description	دیزل خالص Pure diesel	۱۰ درصد بیودیزل سویا 10% soybean biodiesel	۲۰ درصد بیودیزل سویا 20% soybean biodiesel	۱۰ درصد بیودیزل پالم 10% palm biodiesel	۲۰ درصد بیودیزل پالم 20% palm biodiesel	۱۰ درصد بیودیزل کلزا 10% rapeseed biodiesel	۲۰ درصد بیودیزل کلزا 20% rapeseed biodiesel	۱۰ درصد بیودیزل سویا، کلزا، پالم 10% soybean, rapeseed, and palm biodiesel	۲۰ درصد بیودیزل سویا، کلزا، پالم 20% soybean, rapeseed, and palm biodiesel
جرم مولی یا جرم اتمی Molar mass or atomic mass (g mol^{-1})	167	178.5	190	175.9	184.8	178.3	189.6	177.567	188.133
تعریف‌شده در ترسیمه‌های انفیس Described in ANFIS diagrams	1	2	3	4	5	6	7	8	9

جدول ۲- خصوصیات سوخت دیزل و بیودیزل‌های مورداستفاده طبق استاندارد ASTM

Table 2- Properties of used diesel and biodiesel fuels based on ASTM standard

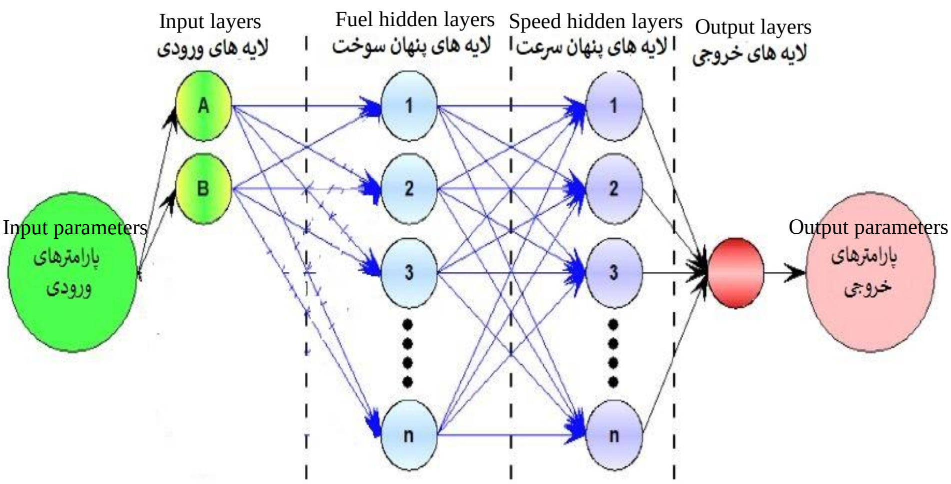
خصوصیات **Properties**	روش آزمون **Test method**	حدود مجاز **Permissible limit**	دیزل خالص **Pure diesel**	بیودیزل کلزا **Rapeseed biodiesel**	بیودیزل سویا **Soybean biodiesel**	بیودیزل پالم **Palm biodiesel**	واحد **Unit**
نقطه اشتعال Flash point	D92	Min 130	62	176	161	174	°C
نقطه ابری Cloud point	D2500	-	-	-1	7	5	°C
آب و رسوبات Water and sediment	D2709	Max 0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	%Vol
گرانروی سینماتیکی Kinematic viscosity	D445	1.6-9	3.35	4.68	4.73	4.5	$mm^2 s^{-1}$
ارزش حرارتی Thermal value	D240	-	46.8	37.74	37.66	41.3	MJ kg^{-1}
چگالی Density	D4052	0.86-0.90	0.83	0.85	0.85	0.86	g cm^{-3}

غلظت آلایندگی گازها، مانند هیدروکربن (HC) و اکسیدهای نیتروژن (NOx) بر حسب ppm و آلاینده‌های دی‌اکسید کربن (CO_2) و مونواکسید کربن (CO) بر حسب درصد حجمی با استفاده از آنالیزگر MAHA MGT5 اندازه‌گیری شد. داده‌های عملکرد و آلایندگی ثبت شده در سه تکرار مدنظر قرار گرفت. توضیحات بیشتر در خصوص مشخصات موتور و طرح شماتیک آزمون آزمایشی در

پژوهش موسوی سیدی و همکاران (Mousavi Seyedi, Askari, & Miri, 2023) ارائه شده است.

استفاده از رگرسیون خطی، غیرخطی و انفیس به‌منظور پیش‌بینی

محققان به دلیل ناتوان بودن در پیش‌بینی متغیرهای خروجی در صورت آزمون کمیت‌های اندازه‌گیری‌نشده در ورودی، نیازمند روشی جایگزین جهت حل مسئله هستند. از روش‌های پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی در تحقیقات علمی و مسائل پیچیده مهندسی، استفاده از رگرسیون خطی، غیرخطی و سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS) است که نتایج تحقیقات گذشته، تاحدودی مزیت گزینه سوم نسبت به گزینه اول را به‌عنوان یک روش قابل‌دوام برای چنین مسائلی اثبات نموده است. اما گزینه دوم بسیار کم مورد بررسی قرار گرفته است. روش انفیس، قوی‌تر از رگرسیون خطی بوده و مجموعه‌ای از رویه‌های ریاضی مبتنی بر آمار است که عمدتاً برای توسعه مدل پیش‌بینی برای تجزیه و تحلیل پارامترهای خروجی مورد نظر استفاده می‌شود که شامل سه لایه تحت عناوین لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی نام‌گذاری می‌شوند. در مطالعه حاضر، مدل انفیس با در نظر گرفتن نوع سوخت و سرعت به‌عنوان توابع ورودی برای پیش‌بینی پارامترهای عملکرد و آلایندگی موتور تحت بار کامل (۱۰۰درصد) به‌عنوان لایه خروجی انتخاب شده است که تابع هدف را برای همبستگی پاسخ‌های خروجی با تعداد پارامترهای ورودی انتخاب شده فراهم می‌کند که طبق طراحی آزمایشات، متغیرهای ورودی شامل ۹ مجموعه سوخت و ۴ سرعت موتور بوده و به‌صورت X1 تا X9 و Y1 تا Y4 در شکل ۲ نشان داده شده است. با تغییر تابع عضویت در ورودی، نتایجی متفاوت با دقت‌های متفاوت در خروجی انفیس خواهیم داشت. پس باید از معیاری به‌منظور شناسایی بهترین تابع عضویت با کمترین خطا و بیشترین قرابت نتایج پیش‌بینی‌شده در خروجی نسبت به نتایج حاصل از آزمون تجربی استفاده شود. پس از مطالعه پژوهش‌های قبلی در این خصوص، دقت نتایج پیش‌بینی‌شده توسط انفیس و دقت نتایج پیش‌بینی‌شده توسط رگرسیون خطی و غیرخطی به کمک ضریب تبیین (R^2) ارزیابی و مقایسه شدند.



شکل ۲- نمایی از مدل شبیه‌سازی‌شده به کمک سامانه استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (انفیس)

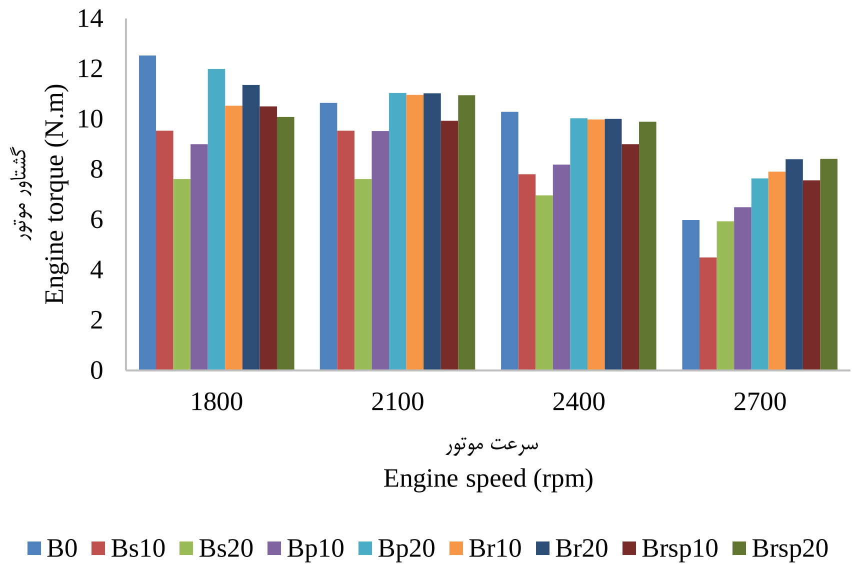
Fig. 2. A view of simulated model using ANFIS

نتایج و بحث

نتایج آزمایشگاهی

نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش سرعت موتور تا دور ۲۴۰۰ دور بر دقیقه، توان موتور در همه مخلوط‌ها از جمله دیزل افزایش و سپس کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش توان بعد از دور مذکور، افزایش تلفات اصطکاکی و کاهش راندمان حجمی موتور است. از طرفی در سرعت ۲۷۰۰ دور بر دقیقه با افزایش بیودیزل نسبت به دیزل خالص، مقدار توان موتور به دلیل ویسکوزیته سینماتیکی بالاتر بیودیزل نسبت به دیزل خالص، افزایش می‌یابد. درخصوص گشتاور مشخص شد که با افزایش دور موتور از ۱۸۰۰ به ۲۷۰۰ دور بر دقیقه، گشتاور موتور به‌صورت ثابت کاهش یافته و این گشتاور در سرعت بالا کاهش زیادی یافت. درخصوص مصرف سوخت ویژه مشخص شد که در همه مخلوط‌ها با افزایش سرعت موتور، مصرف سوخت ویژه افزایش می‌یابد که می‌تواند به دلیل کاهش گشتاور و توان موتور مخصوصاً در سرعت ۲۷۰۰ دور بر دقیقه باشد. در مجموع و در همه سوخت‌های ترکیبی، مقادیر توان و مصرف سوخت ویژه با افزایش سرعت موتور، افزایش اما گشتاور کاهش

یافت. همچنین مقادیر آلاینده‌ها با افزایش سرعت موتور، افزایش یافت. سوخت‌های BS20، BP20، BP10 و BP20 به‌ترتیب برای آلاینده‌های NOx، HC، CO_2 و CO عملکرد بهتری از لحاظ کاهش آلایندگی در سرعت پایین نسبت به سایر سوخت‌ها داشتند. در سرعت‌های بالا با افزایش درصد اختلاط بیودیزل و دیزل از ۱۰ به ۲۰ درصد، مقدار توان و گشتاور موتور افزایش اما میزان مصرف سوخت ویژه و آلاینده‌ها کاهش یافت. بر اساس نتایج، سوخت ترکیبی بیودیزل پالم می‌تواند به‌عنوان سوخت جایگزین در موتورهای دیزل بدون هیچ‌گونه تغییر در ساختار موتور استفاده شود. به‌عنوان نمونه، شکل ۳ نتایج آزمایشگاهی تغییرات گشتاور مخلوط‌های مختلف سوخت دیزل و بیودیزل را به‌عنوان تابعی از سرعت موتور نشان می‌دهد.



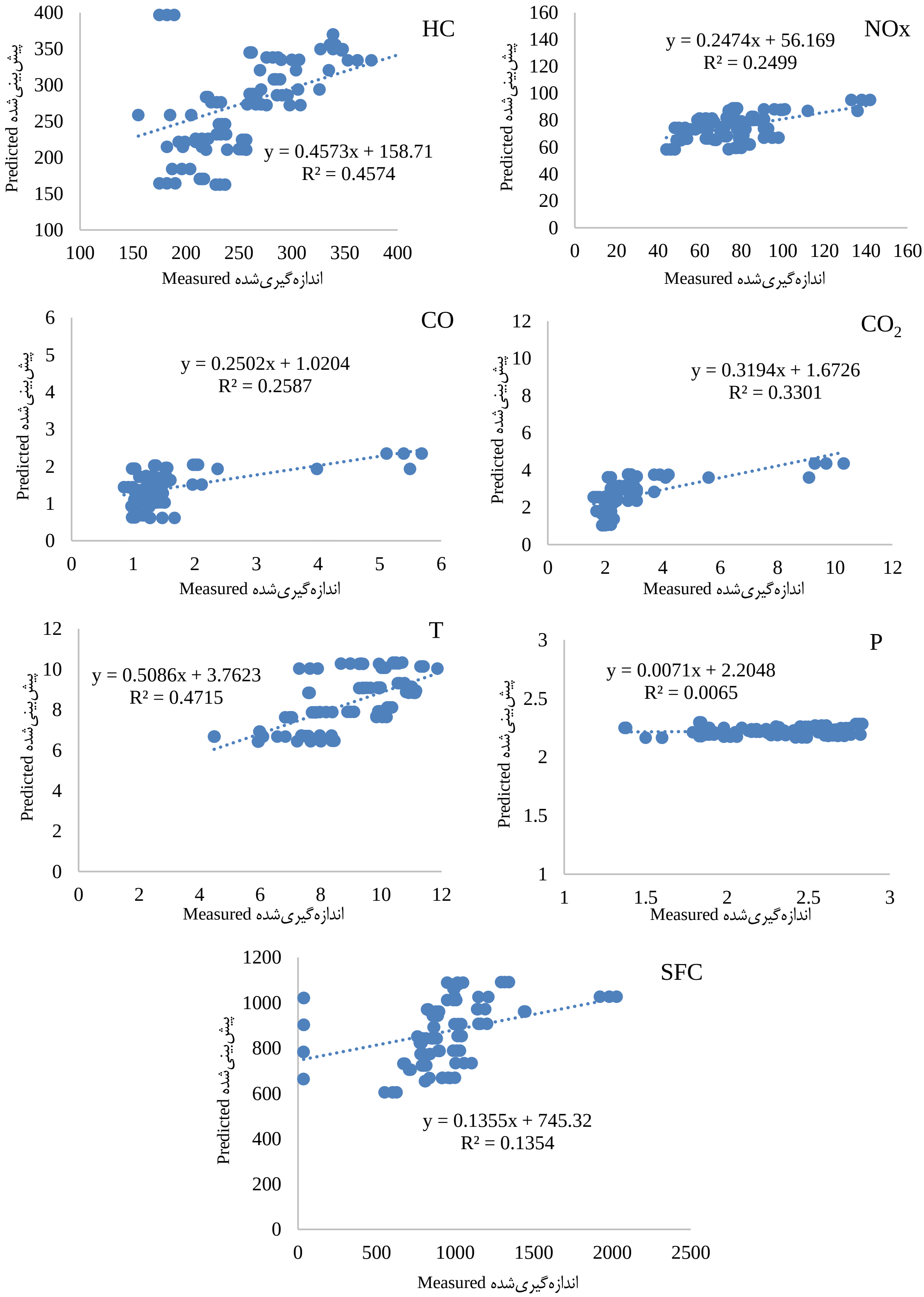
شکل ۳– تغییرات گشتاور موتور در سرعت‌های مختلف برای سوخت‌های آزمایش‌شده

Fig. 3. Changes in the engine torque at different speeds for the tested fuels

در همه مخلوط‌ها، گشتاور موتور با افزایش سرعت موتور کاهش یافت. در تحقیقات قبلی نیز گزارش شده است که در موتورهای تزریق مستقیم، مقادیر حداکثر سرعت موتور، باعث کاهش بازده حجمی و افزایش تلفات مکانیکی می‌گردد (Cihan, 2021). میانگین کاهش گشتاور در سرعت‌های ۱۸۰۰، ۲۱۰۰ ، ۲۴۰۰ و ۲۷۰۰ دور بر دقیقه به‌ترتیب برابر ۱۱/۳۵، ۱۰/۲۳، ۹/۸۶ و ۷/۵۲ نیوتن‌متر بود. با افزایش نسبت بیودیزل در مخلوط سوخت، گشتاور موتور کاهش یافت که این امر به دلیل ارزش حرارتی کمتر و ویسکوزیته بالاتر مخلوط‌های بیودیزل نسبت به دیزل بود. از طرف دیگر این امر می‌تواند مرتبط با دمای گاز خروجی به‌واسطه احتراق در سیلندر باشد. می‌توان گفت که هرچه درجه حرارت بالاتر باشد، عمل سوختن بهتر انجام می‌گردد (Chuah *et al.*, 2015). لذا افزایش در گشتاور موتور برای مخلوط سوخت BP20 (۱/۷۲درصد) در سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه نسبت به دیزل خالص مشاهده شد در حالی‌که کاهش قابل‌توجهی برای BS10 (۲۰/۱۱ درصد) در سرعت ۲۷۰۰ دور بر دقیقه نسبت به دیزل خالص مشاهده گردید. موتور مورداستفاده در تحقیق حاضر، بالاترین گشتاور را در هنگام کار با BP20 در سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه داشت. اطلاعات بیشتر درخصوص نتایج این بخش در پژوهش موسوی سیدی و همکاران (Mousavi Seyedi *et al.*, 2023) در دسترس است.

نتایج مدل‌سازی توسط رگرسیون خطی

با استفاده از نرم‌افزار SPSS به تجزیه داده‌ها و تشکیل مدل‌های رگرسیون خطی پرداخته شد. نتایج به‌دست‌آمده، در جدول ۳ قابل‌مشاهده است. در این جدول، P= توان، T= گشتاور و SFC= مصرف سوخت ویژه موتور می‌باشد. به‌منظور مدل‌سازی پارامترهای تحت بررسی در هرسه روش رگرسیون خطی، غیرخطی و انفیس، برای تعریف انواع سوخت‌های تحت آزمون از جرم مولی یا جرم اتمی (بر حسب گرم بر مول) آن‌ها استفاده شد (جدول ۱). بنابراین به‌ترتیب برای تعریف سوخت دیزل خالص، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد سویا، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد پالم، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد کلزا و ترکیب ۳ بیودیزل مذکور در نسبت ۱۰ و ۲۰ درصد از اعداد ۱۶۷، ۱۷۸/۵، ۱۹۰، ۱۷۵/۹، ۱۸۴/۸، ۱۷۸/۳، ۱۸۹/۶، ۱۷۷/۵۶۷ و ۱۸۸/۱۳۳ با توجه به فرمول شیمیایی مختص به هر سوخت، جرم اتمی (مولی) و تعداد اتم‌های هیدروژن، اکسیژن و کربن هریک از آن‌ها استفاده شد.



شکل ٤– همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های رگرسیون خطی

Fig. 4. Correlation between measured and predicted data using linear regression models

در ادامه نمودارهای مربوط به پیش‌بینی مقادیر ارائه‌شده توسط مدل‌های رگرسیون خطی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری‌شده ارائه شده است. محور افقی در شکل ۴ مقادیر واقعی (اندازه‌گیری‌شده در آزمون) و محور عمودی مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط معادلات رگرسیون خطی است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، ضرایب تبیین مدل‌های رگرسیون خطی مقادیر بالایی نیستند (۰/۰۰ الی ۰/۴۷) و در واقع این مدل‌ها نتوانستند با دقت بالایی به پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی بپردازند.

نتایج مدل‌سازی توسط رگرسیون غیرخطی

به کمک جستجو در پژوهش‌های مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی و معادلات غیرخطی پیش‌فرض ارائه‌شده توسط نرم‌افزارهای Excel و SPSS، دو رابطه مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی پرتکرار به‌صورت روابط (۱) و (۲) تحت بررسی قرار گرفت.

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + c_1 X_1^2 + c_2 X_2^2 + d X_1 X_2 \quad (۱)$$

$$Y = a \exp (b_1 X_1 + b_2 X_2) \quad (۲)$$

جدول۳- مدل‌های رگرسیون خطی درخصوص پارامترهای تحت بررسی

Table 3- Linear regression models of the studied parameters

پارامتر Parameter	مدل رگرسیونی Regression model
NOx (ppm)	Y= 150.405 - 0.703 Fuel + 0.023 Speed
HC (ppm)	Y= 587.144 - 4.186 Fuel + 0.206 Speed
CO_2 (%Vol)	Y= 9.977 - 0.066 Fuel + 0.002 Speed
CO (%Vol)	Y= 5.654 - 0.036 Fuel + 0.001 Speed
P (kW)	Y= 2.851 - 0.004 Fuel + 0.00004198 Speed
T (N.m)	Y= 21.220 - 0.021 Fuel - 0.004 Speed
SFC (gkW h^{-1})	Y= -1051.232 + 5.633 Fuel + 0.397 Speed

جدول ٤- ضرایب رابطه ۱

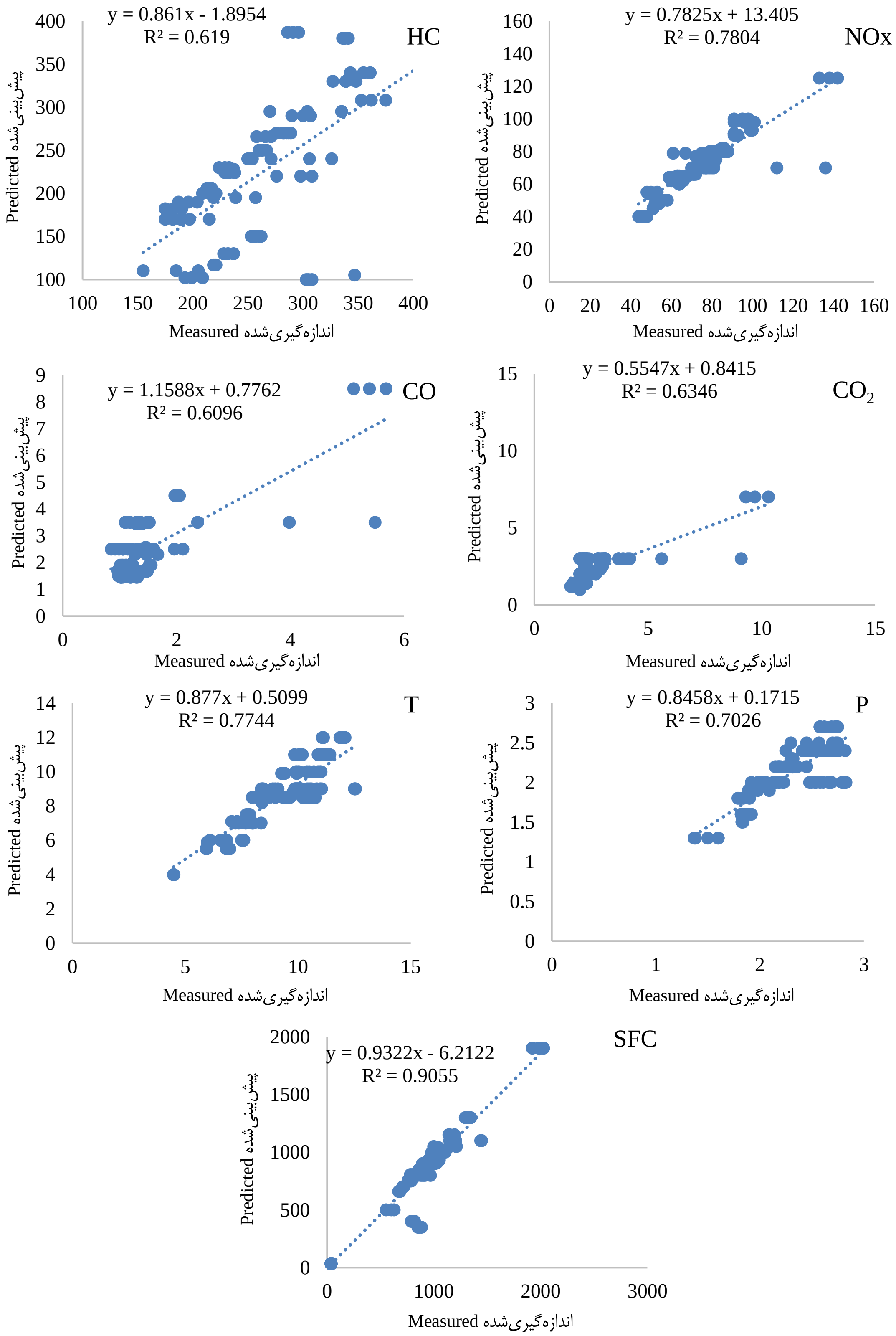
Table 4- Coefficients of relation 1

ضریب Coefficient	مقدار Amount						
	NO_x	HC	CO_2	CO	P	T	SFC
a	2.00E-03	5.12E-09	4.02E-07	0.01	1.58E-06	0.01	0.99
b_1	2.52	0	0.04	0.01	5.16E-05	0.099	0.97
b_2	0.0835	0	0.098	0	3.14E-06	0.0021	0.39
c_1	3.81E-06	1.21E-09	2.64E-05	0	3.36E-06	0.098	0.03
c_2	4.33E-06	4.43E-05	6.48E-07	0.01	0	0.01	5.99E-04
d	0.01	5.15E-05	1.10E-06	0.01	0.002	0.02	0.03

جدول ٥- ضرایب رابطه ۲

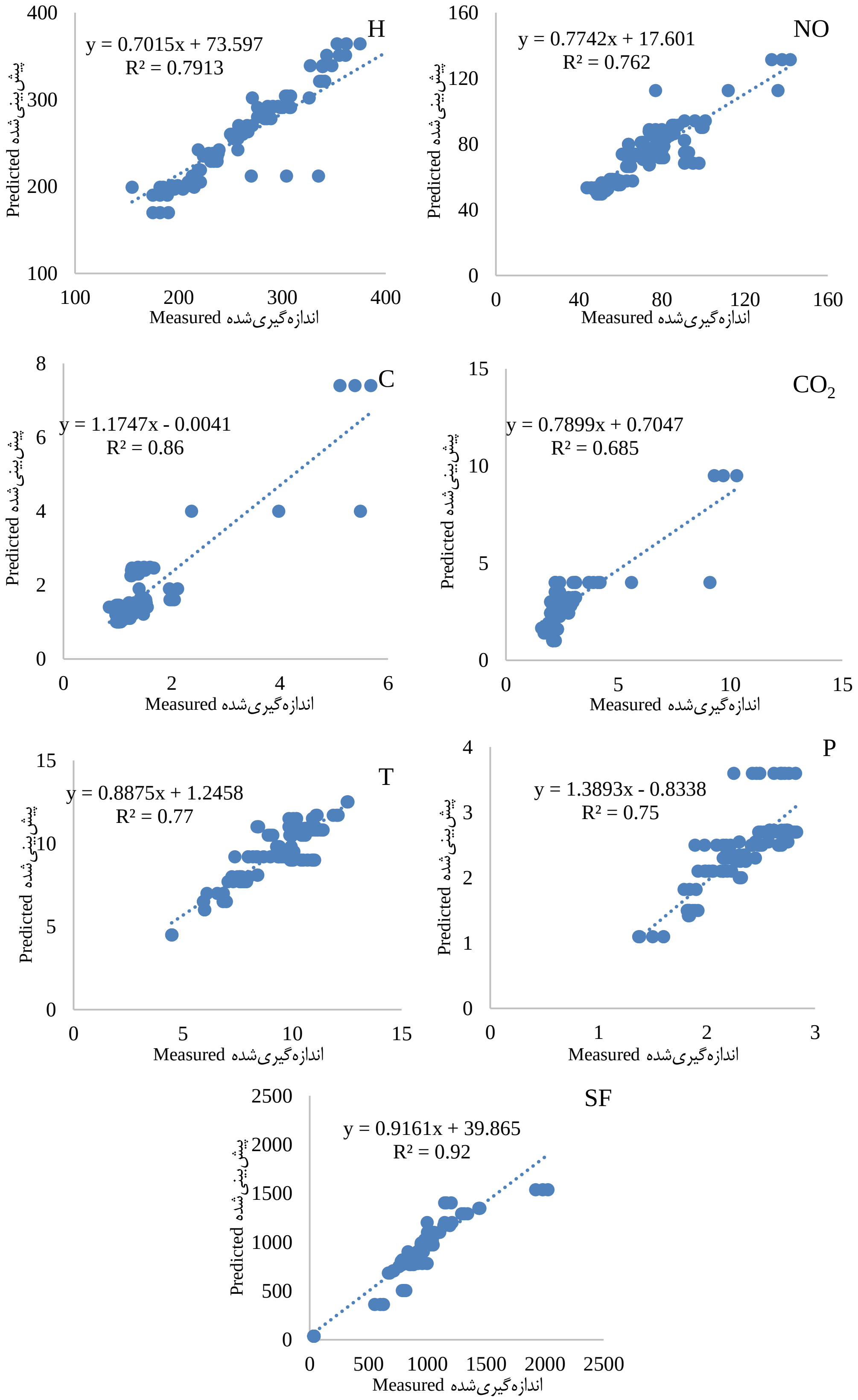
Table 5- Coefficients of relation 2

ضریب Coefficient	مقدار Amount						
	NO_x	HC	CO_2	CO	P	T	SFC
a	30.75	36.727	0.39	0.225	3.1167	5.749	171.09
b_1	0.016	0	0.002	0.001	0.9463	0.022	0.003
b_2	0.0504	0.0919	0.873	0.0912	3.21E-03	0.00231	0



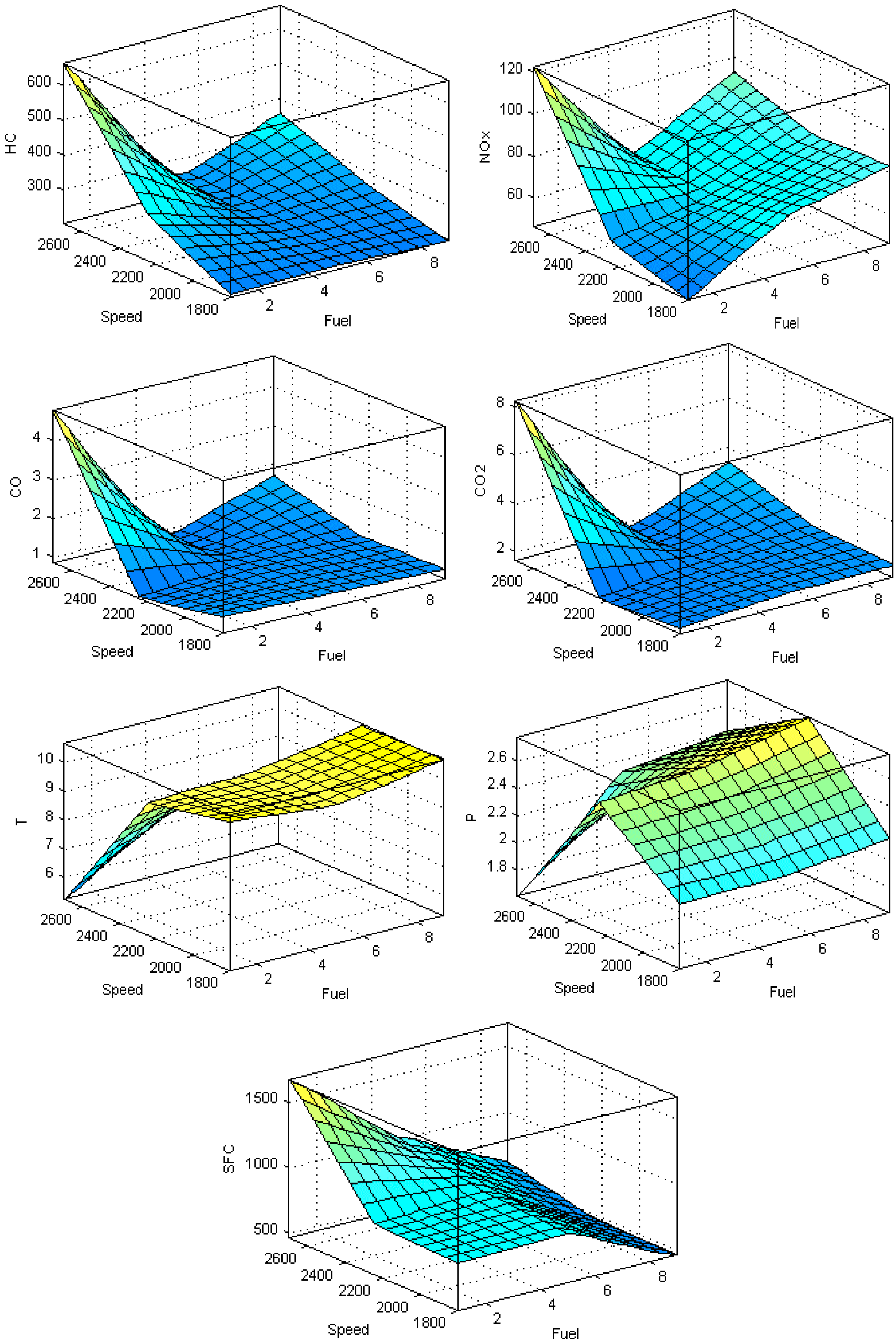
شکل ۵- همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده توسط رابطه ۱ رگرسیون غیرخطی

Fig. 5. Correlation between measured and predicted data using relation 1 Non-linear regression



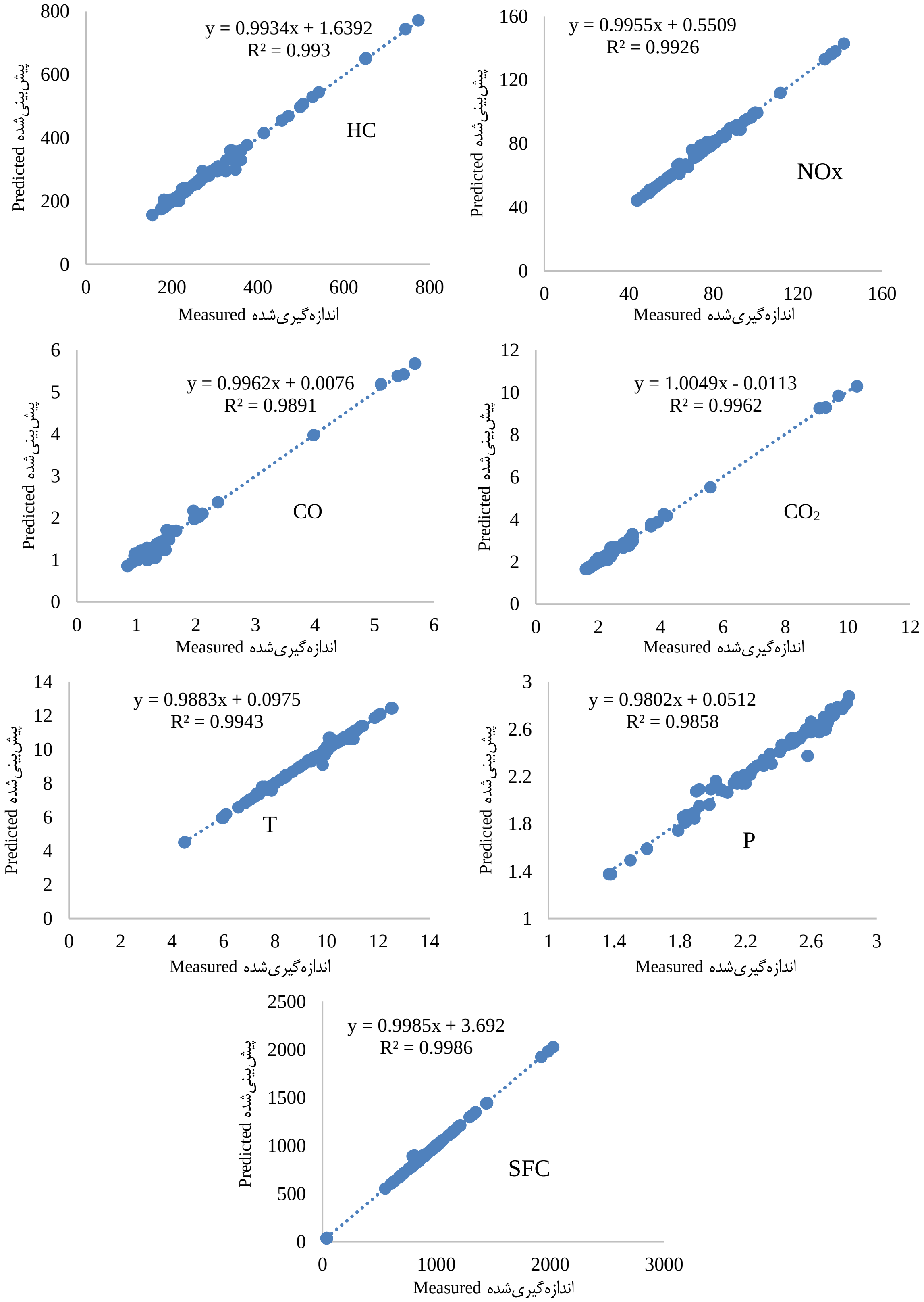
شکل ٦– همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده توسط رابطه ۲ رگرسیون غیرخطی

Fig. 6. Correlation between measured and predicted data using relation 2 Non-linear regression



شکل ۷- سطوح سه‌بعدی بهترین مدل‌های انفیس به‌منظور پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی

Fig. 7. 3D surfaces of best ANFIS models for predicting the studied parameters



شکل ۸– همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری‌شده (محور افقی) و پیش‌بینی‌شده (محور عمودی) توسط مدل‌های انفیس

Fig. 8. Correlation between measured (horizontal axis) and predicted (vertical axis) data using ANFIS models

در روابط فوق، a، b_1، b_2، c_1، c_2 و d ضرایب ثابت بهینه‌ای هستند که در جداول ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. همچنین متغیر X_1 مربوط به نوع سوخت تحت بررسی که توسط جرم مولی یا جرم اتمی (بر حسب گرم بر مول) آن‌ها (مطابق با جدول ۱) به‌صورت کمی (عددی) تعریف شده و متغیر X_2 دور موتور ۱۸۰۰، ۲۱۰۰، ۲۴۰۰ و ۲۷۰۰ دور بر دقیقه است.

با جای‌گذاری ضرایب بهینه و مقادیر مرتبط با نوع سوخت و دور موتور، مقادیر پیش‌بینی‌شده برای هر داده ورودی به‌دست آمد. به‌ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نمودارهای مربوط به پیش‌بینی مقادیر ارائه‌شده توسط مدل‌های رگرسیونی غیرخطی ۱ و ۲ در مقابل مقادیر اندازه‌گیری‌شده ارائه شده است.

ضرایب تبیین (R^2) میان داده‌های اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده توسط معادلات رگرسیون غیرخطی بیشتر از همین ضرایب در معادلات رگرسیون خطی است. در نتیجه معادلات رگرسیون غیرخطی ارائه‌شده با دقت بیشتری به پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی پرداختند. بیشترین و کمترین ضرایب تبیین در معادلات رگرسیون خطی مربوط به پارامترهای T و P به‌ترتیب به میزان ۰/۴۷ و ۰/۰۰ است در حالی‌که بیشترین و کمترین ضرایب تبیین در معادلات رگرسیون غیرخطی مربوط به پارامترهای SFC و CO به‌ترتیب به میزان ۰/۹۲ و ۰/۶۰ است.

نتایج مدلسازی توسط انفیس

نتایج مربوط به بهترین مدل‌های انفیس در خصوص پارامترهای تحت بررسی در شکل ۷ آمده است. این بخش شامل ترسیمه‌های سه‌بعدی انفیس است. با استفاده از سطوح این شکل‌ها، می‌توان خروجی مدل مورد نظر را برای ورودی خاصی که داده‌برداری نشده است را محاسبه کرد (Askari & Abbaspour-Gilandeh, 2019; Shafaei, Loghavi, & Kamgar, 2019). در محور مربوط به نوع سوخت در این ترسیمه‌ها مطابق با جدول ۱، به‌ترتیب برای تعریف سوخت دیزل خالص، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد سویا، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد پالم، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد کلزا و ترکیب ۳ بیودیزل مذکور در نسبت ۱۰ و ۲۰ درصد از اعداد ۱ الی ۹ استفاده شده است.

در ادامه مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط بهترین (دقیق‌ترین) مدل‌های انفیس برای تمامی پارامترهای تحت بررسی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری‌شده در آزمون‌ها ترسیم گردید. محور افقی در شکل ۸ مقادیر واقعی (اندازه‌گیری‌شده در آزمون) و محور عمودی مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط بهترین مدل‌های انفیس در خصوص پارامترهای تحت بررسی است. نتایج نشان داد که ضریب تبیین (R^2) به‌عنوان معیار دقت پیش‌بینی مدل‌های انفیس بسیار بیشتر از مدل‌های رگرسیونی خطی و غیرخطی است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، انفیس با دقت بسیار بالاتری در مقایسه با رگرسیون خطی و غیرخطی توانسته است که پارامترهای تحت بررسی را پیش‌بینی نماید. بیشترین و کمترین ضرایب تبیین در معادلات ارائه‌شده توسط انفیس مربوط به پارامترهای SFC و P به‌ترتیب به میزان ۰/۹۹ و ۰/۹۸ است که بسیار بیشتر از ضرایب تبیین بیشینه و کمینه در معادلات رگرسیون خطی (۰/۴۷ و ۰/۰۰) و غیرخطی (۰/۹۲ و ۰/۶۰) است. در مجموع و در میان تمامی پارامترهای بررسی‌شده در پژوهش حاضر و تمامی مدل‌های رگرسیون خطی، غیرخطی و انفیس، بیشترین ضریب متوسط تبیین مربوط به گشتاور موتور (T=۰/۷۵۲۵) و کمترین ضریب متوسط تبیین مربوط به توان موتور (P=۰/۶۱۱۲) می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج بخش آزمایشگاهی نشان داد که در همه سوخت‌های ترکیبی مقادیر توان، مصرف سوخت ویژه و تمامی آلاینده‌ها با افزایش سرعت موتور، افزایش اما گشتاور کاهش یافت. بر اساس نتایج، سوخت ترکیبی بیودیزل پالم ۲۰ درصد می‌تواند به‌عنوان سوخت جایگزین در موتورهای دیزلی بدون هیچ‌گونه تغییر موتور استفاده شود. نتایج بخش مدل‌سازی نشان داد که معادلات رگرسیون غیرخطی نسبت به نوع خطی با دقت بیشتری به پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی پرداختند. همچنین مشخص شد که بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده متغیرهای عملکرد و آلایندگی موتور توسط انفیس، همبستگی بسیار بالاتری (ضریب تبیین بیشتر از ۰/۹۸) در قیاس با رگرسیون خطی (ضریب تبیین کمتر از ۰/۴۷) و رگرسیون غیرخطی (ضریب تبیین کمتر از ۰/۹۲) وجود دارد. بیشترین و کمترین ضرایب تبیین در معادلات ارائه‌شده توسط انفیس مربوط به پارامترهای SFC و P به‌ترتیب به میزان ۰/۹۹ و ۰/۹۸ است که بسیار بیشتر از ضرایب تبیین بیشینه و کمینه در معادلات رگرسیون خطی (۰/۴۷ و ۰/۰۰ به‌ترتیب مربوط به T و P) و غیرخطی (۰/۹۲ و ۰/۶۰ به‌ترتیب مربوط به SFC و CO) است. در مجموع، بیشترین ضریب متوسط تبیین مربوط به گشتاور موتور (T=۰/۷۵۲۵) و کمترین ضریب متوسط تبیین مربوط به توان موتور (P=۰/۶۱۱۲) می‌باشد. به‌علاوه، با استفاده از سطوح ترسیمه‌های سه‌بعدی انفیس می‌توان خروجی مدل مورد نظر برای ورودی خاصی که داده‌برداری نشده است را محاسبه کرد. در نتیجه می‌توان از انفیس به‌منظور پیش‌بینی بسیار دقیق پارامترهای عملکرد و آلایندگی موتور استفاده نمود. با استفاده از این روش پیش‌بینی مطمئن، کار آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌ها به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد که در مدت زمان و هزینه امور آزمایشگاهی،

صرفه‌جویی می‌گردد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری که فرصت تصویب و انجام این طرح پژوهشی با کد طرح ۱۱-۱۴۰۰-۰۲ را فراهم نمودند، تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

مشارکت نویسندگان

سیدرضا موسوی سیدی: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، نظارت و مدیریت، روش‌شناسی

محمد عسکری: خدمات نرم‌افزاری، تصویرسازی نتایج، شبیه‌سازی کامپیوتری، ویرایش متن

سیدمحمدرضا میری: استخراج و تهیه متن اولیه، مفهوم‌سازی، مشاوره فنی

References

1. Al-Dawudy, M. F. T. (2017). Theoretical study for the influence of biodiesel addition on the combustion, performance and emissions parameters of single cylinder diesel engine. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, *25*(5), 1830-1839. https://search.emarefa.net/detail/BIM-918202
2. Al-Dawody, M. F., Jazie, A., & Abdulkadhim Abbas, H. (2019). Experimental and simulation study for the effect of waste cooking oil methyl ester blended with diesel fuel on the performance and emissions of diesel engine. *Alexandria Engineering Journal*, *58*, 9-17. https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.05.009
3. Askari, M., & Abbaspour-Gilandeh, Y. (2019). Assessment of adaptive neuro-fuzzy inference system and response surface methodology approaches in draft force prediction of subsoiling tines. *Soil and Tillage Research*, *194*, 104338. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104338
4. Askari, M., Abbaspour-Gilandeh, Y., Taghinezhad, E., El Shal, A. M., Hegazy, R., & Okasha, M. (2021). Applying the response surface methodology (RSM) approach to predict the tractive performance of an agricultural tractor during semi-deep tillage. *Agriculture*, *11*, 1043. https://doi.org/10.3390/agriculture11111043
5. Chuah, L. F., Aziz, A. R. A., Yusup, S., Bokhari, A., Klemeš, J. J., & Abdullah, M.Z. (2015). Performance and emission of diesel engine fueled by waste cooking oil methyl ester derived from palm olein using hydrodynamic cavitation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *17*, 2229-2241. https://doi.org/10.1007/s10098-015-0957-2
6. Cihan, O. (2021). Experimental and numerical investigation of the effect of fig seed oil methyl ester biodiesel blends on combustion characteristics and performance in a diesel engine. *Energy Reports*, *7*, 5846-5856. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.180
7. Elkelaw, M., Alm-Eldin Bastawissi, H., El Shenawy, E. A., Taha, M., Panchal, H., & Kumar Sadasivuni, K. (2021). Study of performance, combustion, and emissions parameters of DI-diesel engine fueled with algae biodiesel/diesel/n-pentane blends. *Energy Conversion and Management: X*, *10*, 100058. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100058
8. Ghanbari, M., Najafi, G., Ghobadian, B., Mamat, R., Noor, M. M., & Moosavian, A. (2015). Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) to predict CI engine parameters fueled with nano-particles additive to diesel fuel. *3rd International Conference of Mechanical Engineering Research*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 100: 012070. https://doi.org/10.1088/1757-899X/100/1/012070
9. Hosoz, M., Ertunc, H. M., Karabektas, M., & Ergen, G. (2013). ANFIS modelling of the performance and emissions of a diesel engine using diesel fuel and biodiesel blends. *Applied Thermal Engineering*, *60*(1-2), 24-32. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.06.040
10. Khiraiya, K., Ramana, P. V., Panchal, H., Kumar Sadasivuni, K., Doranehgard, M. H., & Khalid, M. (2021). Diesel-fired boiler performance and emissions measurements using a combination of diesel and palm biodiesel. *Case Studies in Thermal Engineering*, *27*, 101324. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101324
11. Lee, S., Yi, E., Cho, Y., & Ahn, K. (2022). The path to a sustainable palm oil futures market. *Energy Reports*, *8*, 6543-6550. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.04.048
12. Menacer, B., & Bouchetara, M. (2014). Parametric study of the performance of a turbocharged compression ignition engine. *Simulation*, *90(12)*, 1375-1384. https://doi.org/10.1177/0037549714557046
13. Mousavi Seyedi, S. R., Askari, M., & Miri, S. M. R. (2023). Laboratory Investigation of the performance and emissions of biodiesel-diesel fuel blends from rapeseed, soybean and palm oil biodiesels. *Modares Mechanical Engineering*, *23*(06), 347-356. https://doi.org/10.22034/mme.23.6.347
14. Ogunkunle, O., & Ahmed, N. A. (2019a). A review of global current scenario of biodiesel adoption and combustion in vehicular diesel engines. *Energy Reports*, *5*, 1560-1579. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.028
15. Ogunkunle, O., & Ahmed, N. A. (2019b). Performance evaluation of a diesel engine using blends of optimized yields of sand apple (*Parinari polyandra*) oil biodiesel. *Renewable Energy*, *134*, 1320-1331. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.040

16. Ogunkunle, O., & Ahmed, N. A. (2020). Exhaust emissions and engine performance analysis of a marine diesel engine fuelled with Parinari polyandra biodiesel-diesel blends. *Energy Reports*, *6*, 2999-3007. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.10.070
17. Sayyed, S., Kumar Das, R., & Kulkarni, K. (2021). Performance assessment of multiple biodiesel blended diesel engine and NOx modeling using ANN. *Case Studies in Thermal Engineering*, *28*, 101509. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101509
18. Shafaei, S. M., Loghavi, M., & Kamgar, S. (2019). Prognostication of energy indices of tractor-implement utilizing soft computing techniques. *Information Processing in Agriculture*, *6*, 132-149. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.08.001
19. Singh, A., Sinha, Sh., Kumar Choudhary, A., Sharma, D., Panchal, H., & Kumar Sadasivuni, K. (2021). An experimental investigation of emission performance of heterogenous catalyst jatropha biodiesel using RSM. *Case Studies in Thermal Engineering*, *25*, 100876. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100876